

М. С. Редунова, Е. Ю. Павлюк

Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

M.Redunova@yandex.ru

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА В ТРУБЕ ПРИ РАСХОЛАЖИВАНИИ ТРУБОПРОВОДОВ

В работе проведено литературное исследование для актуализации вопроса о расчете температурного поля в трубе. Показана необходимость определения температурного поля внутри трубопровода при его расхолаживании.

Ключевые слова: *трубопровод, расхолаживание, температурное поле, легионелла.*

M. S. Redunova, E. Yu. Pavlyuk

Ural Federal University, Ekaterinburg

HEAT TRANSFER CALCULATION FOR PIPES WITH COOL-DOWN

In order to show the importance of temperature field calculation at heat pipe system the literary investigation was proceeded. Mathematical model of temperature field inside tube pipes is presented.

Key words: *pipe, cool-down, temperature field, Legionella pneumophila.*

До 2009 года для систем централизованного горячего водоснабжения, присоединяемых к закрытым системам теплоснабжения, температура горячей воды в местах водоразбора устанавливалась не ниже 50 °С [1]. Снижение регламентированной температуры приводит к тяжелому последствию, такому как появление патогенных микроорганизмов. Так, например, теплая пресная жидкость – это отличная среда для обитания легионеллы (*Legionella pneumophila*). Легионелла (*Legionella pneumophila*) – подвижная палочковидная бактерия рода *Legionella*, возбудитель легионеллеза («болезни легионеров») – острого инфекционного

заболевания. Механизм передачи – аспирационный [2]. Возбудитель отнесён к III группе патогенности [3]. В горячей воде легионелла ведет себя неоднозначно. Известный датский исследователь Лена Багх (Lena Bagh) в 2004 году на Конгрессе по легионелле в Амстердаме привела любопытные данные. Так, при 50 °С легионелла выживает, но не размножается. При 55 °С бактерии погибают в течение 5–6 ч. При 60 °С бактерии погибают за 32 мин. При 65 °С легионелла погибает за 2 мин. Температуры 70–80 °С – диапазон мгновенной безусловной дезинфекции [4].

Яркий пример снижения температуры ГВС приведший к трагическим последствиям произошел в июле 2007 г. в г. Верхняя Пышма Свердловской области, где из-за вспышки легионеллеза за медицинской помощью обратилось 202 человека, диагноз «болезнь легионеров» был выставлен 74 заболевшим, а пять человек скончались в больнице. Инцидент был связан с нарушением санитарных норм эксплуатации системы ГВС в период отключения горячего водоснабжения и проведения опрессовок. Рост бактерий был вызван длительным застоем воды в трубопроводе и снижением ее температуры до опасного значения. Именно эта вода, попавшая в квартиры, и стала причиной массового инфекционного заболевания.

После данного инцидента в 2009 г. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации Онищенко Г.Г. постановил внести изменения в СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества», повышающие нормативную температуру ГВС. С 1 сентября 2009 года, согласно СанПиН 2.1.4.2496-09 «Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. Изменение к СанПиН 2.1.4.1074-01» температура горячей воды в местах водоразбора независимо от применяемой системы теплоснабжения должна быть не ниже 60°C и не выше 75°C. Однако существуют противоречия по этому поводу, так СП 124.13330.2012 «Тепловые сети» при выборе температуры ГВС обращаются к СанПиН 2.1.4.1074-01 (п. 7.6), а СП 30.13330.2016 «Внутренний

водопровод и канализация зданий» кроме требований СанПиН 2.1.4.1074-01 устанавливают диапазон температур не ниже 60 °С и не выше 65 °С (п. 5.1.2).

Исходя из всего вышесказанного расчет тепловых потерь трубопроводов, транспортирующих различные технологические среды, имеет существенное практическое значение. В частности, подобная задача ставится при определении длительности расхолаживания теплопровода после остановки циркуляции. В этом случае простейшее решение, основанное на предположении о постоянстве температуры по объему жидкости, ограниченному внутренней поверхностью цилиндра радиуса R , находится из уравнения теплового баланса

$$mC_p \frac{dT}{dt} = \rho V C_p \frac{dT}{dt} = -\alpha_{eff}(T - T_0)S. \quad (1)$$

Для цилиндра длиной L отношение объема V к боковой поверхности теплосъема S равно

$$\frac{S}{V} = \frac{2\pi RL}{\pi R^2 L} = \frac{2}{R}. \quad (2)$$

При постоянной температуре окружающей среды ($T_{cp} = const$) эволюция температуры по времени от начального значения T_0 описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d\vartheta}{dt} = -\frac{2\alpha_{eff}}{\rho C_p R} \vartheta; \quad \vartheta \equiv \frac{T - T_0}{T_{cp} - T_0}, \quad (3)$$

решение которого для термически тонкого цилиндра имеет вид

$$\vartheta = \frac{T - T_0}{T_{cp} - T_0} = \exp\{-2Bi \cdot Fo\}, \quad (4)$$

Значения критериев Био и Фурье определяются из выражений

$$Bi = \frac{\alpha_{eff} R}{\lambda}, Bi < 0,1 \quad (5)$$

$$Fo = \frac{at}{R^2}, a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (6)$$

Эффективный коэффициент теплоотдачи α_{eff} учитывает все термические сопротивления на пути теплового потока от жидкости в окружающую среду.

При переменной по времени температуре окружающей среды $T_{cp} = \varphi(t)$ уравнение несколько усложняется

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{2\alpha_{eff}}{\rho c_p R} \{T - \varphi(t)\} \equiv -\beta \cdot \{T - \varphi(t)\} \quad (7)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$T(t) = T_0 \exp[-\beta t] + \beta \int_0^t \varphi(\tau) \exp\{-\beta(t - \tau)\} d\tau \quad (8)$$

Задача реконструкции температурного поля в трубопроводе, заполненном движущейся жидкостью, формулируется следующим образом

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{w} \cdot \nabla)T = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho c_p} \quad (9)$$

Для стационарного осесимметричного течения среды вдоль оси полуограниченной круглой трубы при отсутствии тепловыделения внутри области течения $\left[T = T(r, z); \frac{\partial T}{\partial t} = 0; \vec{w} = (0, 0, w_z); q_v = 0 \right]$ приведенное выше уравнение теплопроводности приобретает вид

$$w_z = \frac{\partial T}{\partial z} = a \left\{ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right\} \quad (10)$$

В результате построения модели и ее решения комбинацией метода Галеркина и интегрального преобразования Лапласа по переменной z получим в первом приближении поле температур в полуограниченной трубе круглого поперечного сечения

$$T(r, z) = T_0 + A \left[\frac{Bi+2}{Bi} - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \exp\{-Bz\}; A, B - const. \quad (11)$$

Дальнейшие вычисления позволяют определить потери тепла с боковой поверхности трубы. Погрешность приближения оценивается путем сравнения с классическими результатами из литературы. При необходимости точность расчетов можно повысить включением в вычисления следующих членов ряда, определяющего температурное поле.

Список использованных источников

1. СНиП 2.04.01-85 Внутренний водопровод и канализация зданий.
2. Коротяев А. И., Бабичев С. А. Медицинская микробиология, иммунология и вирусология : учебник для мед. вузов / А. И. Коротяев, С. А. Бабичев. СПб. : СпецЛит, 2010. 5е изд., испр. и доп. 760 с.
3. СП 1.3.2322-08 Безопасность работы с микроорганизмами III-IV групп патогенности (опасности) и возбудителями паразитарных болезней.
4. Наука и молодежь : проблемы, поиски решения : труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Сиб. гос. индустр. ун-т; под общ. ред. М.В. Темлянцева. Новокузнецк : Изд. Центр СибГИУ, 2016. Вып. 20. Ч. V. Технические науки. 223 с., ил. 88, таб. 21.